



Studi Pengaruh Bentuk dan Kemiringan Permukaan Pilar Terhadap Kekuatan dan Faktor Keamanan Pilar

(Study Of Shape and Inclined Surface Pillar Effect On Strength Of Pillar)

Rully Nurhasan Ramadani^{1,2}, Iswandaru¹, Ridho .K. Wattimena², Made .A. Rai²

¹ Program Studi Magister Rekayasa Pertambangan, Institut Teknologi Bandung

² Program Studi Teknik Pertambangan, Universitas Islam Bandung

Abstract

Study of stability and pillar failure mechanism with a variety of methods have been carried with empirical and analytical approach. H. Moomivand dan V.S. Vutukuri in 2008 do to research with physical model of coal cubic with ratio of 0,25 to 10 with surface of pillar is horizontal, this research aims to investigated changes in the ratio of pillar on compressive strength and pillar mine failure mechanism, to study the relationship do the physical modelling with 5 variations of height of 5 cm – 40 cm each pillar geometry has 7 variatons inclined surface 0°-30°. Samples of the pillar of testing with direction of the axial load on the body pillar until failure. Other than that do to 2D numerical modelling with finite element methods with assisted of software Phase2 (Rockscience). Physical modelling result showed the value of the compressive strength and the strength of pillar will be increased with the increasing ratio of pillars w/h. Effect of change in the inclined surface pillar to the compressive strength and pillar of strength showed no behavioral changes in the compressive strength and the strength of the pillars to change the angle of the surface of the pillar. Changes in strength factor and sigma 1 showed decreasing of the value when the angle of the pillar is increasing even though the changes in the value of the numerical modeling results are not significant.

Keywords: Mechanism, failure, Pillar, Finite Element, horizontal, displacement, strength.

1. Pendahuluan

Metode *room and pillar* merupakan salah satu contoh metode penambangan bawah tanah yang digunakan untuk endapan bahan galian batubara, bijih dan endapan bahan galian lainnya. Penurunan permukaan yang disebabkan oleh penambangan bawah tanah merupakan bencana serius dalam tambang. Dalam metode *room and pillar*, kestabilan pilar menjadi perhatian utama selama kegiatan penambangan agar tidak terjadi keruntuhan tambang bawah tanah.

Mekanisme keruntuhan pilar perlu dipahami agar dapat mengetahui tipe runtutan dan menilai kekuatan dari pilar, penyebab dasar dari tidak kestabilan pilar yang memungkinkan yaitu mode keruntuhan *progressive* yang terjadi selama jangka waktu dan merupakan hasil dari pelepasan energi yang bertahap pada pilar dan mode keruntuhan *bursting* ditandai dengan pelepasan energi yang cepat dari massa batuan

pilar, keruntuhan akan mengakibatkan tingkat kerusakan yang tinggi, dimana kekakuan massa batuan induk (sekitar pilar) lebih kecil dibandingkan massa batuan pilar, dengan kondisi tersebut batuan induk dapat menyimpan energi mirip dengan pegas. Ketika batuan induk melepaskan energi yang tersimpan, keruntuhan pada pilar yang dihasilkan akan cepat (Budavari, 1989).

Terdapat beberapa faktor yang berkontribusi terhadap kestabilan pilar, dalam beberapa kasus keruntuhan pilar dapat disebabkan lebih dari satu faktor penyebab keruntuhan pilar yaitu dikarenakan kekuatan batuan, tegangan yang diterima batuan, bentuk pilar (rasio ukuran lebar terhadap tinggi pilar), volume pilar yang akan memiliki pengaruh pada kondisi struktur.

Rasio lebar terhadap tinggi pada pilar memiliki peranan dalam mengendalikan kestabilan pilar, bahkan tidak hanya rasio pilar namun lebar dari zona non-elastis mempengaruhi dalam kestabilan pilar (Gao Wei, 2014). Beberapa penelitian mengenai kestabilan pilar dan mekanisme keruntuhan pilar dengan berbagai metode telah dilakukan di antaranya dengan pendekatan empiris dalam mengestimasi kekuatan pilar batuan keras, Rasio lebar/tinggi

* Korespondensi Penulis : (Rully Nurhasan R)
 Prodi Teknik Pertambangan UNISBA
 E-mail : rully.mp354@gmail.com
 Hp : 082117778214

(w/h) dari pilar batubara umumnya lebih besar dibandingkan rasio lebar/tinggi (w/h) dari pilar batuan keras (P.J Lunder, 1994). Simulasi numerik pada keruntuhan pilar di lapisan batubara yang dalam (M.D.G. Salamon, R.Mendoza, M.U. Ozbay, 2003), melakukan pendekatan analitik terhadap runtuh pilar dengan belahan axial pada batuan yang rapuh (G.E. Exadaktylos, C.E Tsoutrelis, 1995), pemodelan fisik skala besar dengan pengujian insitu untuk melihat hubungan bentuk ukuran terhadap kekuatan (Bieniawski, Van Heerden, 1975) dan investigasi terhadap kuat tekan dan mekanisme keruntuhan pilar tambang (H. Moomivand, V.S. Vutukuri, 2008).

Mempelajari hubungan pengaruh bentuk dengan sudut kemiringan permukaan pilar terhadap kekuatan pilar dengan permodelan fisik dengan skala laboratorium dan pemodelan numerik. Studi dilaksanakan di Laboratorium Geomekanika dan Peralatan Tambang ITB.

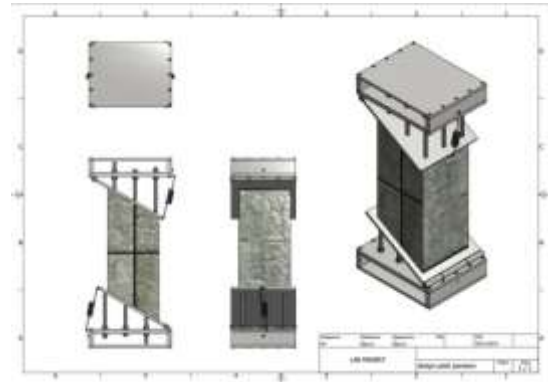
2. Metode Penelitian

Studi yang dilakukan dengan skala laboratorium ini secara umum terbagi menjadi beberapa tahap terdiri dari (i) studi literatur; (ii) persiapan contoh batuan dan alat uji; (iii) pengujian model fisik pilar; (iv) pemodelan numerik; (v) analisis dan pembahasan. Model fisik pilar yang digunakan memiliki variasi rasio pilar (W / H) 0,25 – 10 dengan masing-masing memiliki 7 variasi kemiringan ($\alpha = 0^\circ - 30^\circ$), pendekatan pengujian pada seluruh model fisik dilakukan dengan uji kuat tekan (Uniaxial Compressive Strength Test)



Gambar 1. Model fisik pilar

Material yang digunakan untuk model fisik pilar yaitu beton dengan perbandingan volume material semen dan pasir 1:4,5 serta air sebagai fluida pemcampur material. Alat pendukung uji kuat tekan perlu penyesuaian dikarenakan permukaan pilar memiliki kemiringan.



Gambar 2. Alat pendukung uji kuat tekan pilar

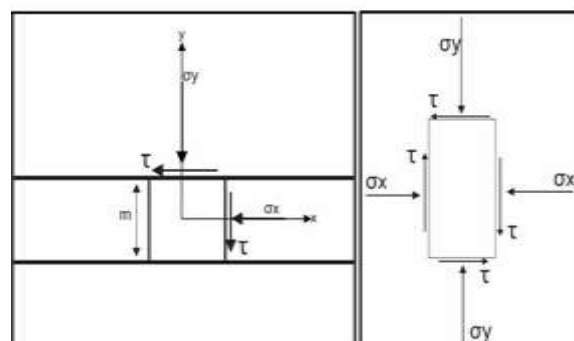
Pengaruh bentuk pada kuat tekan uniaksial pada pilar terhadap nilai kuat tekan menggunakan pendekatan persamaan ASTM dan Protodyakonov untuk nilai kekuatan pilar menggunakan persamaan Obert & Duvall (1967) yang mengasumsikan pilar dengan rasio W / H akan berbanding lurus dengan nilai kekuatan pilar. Pemodelan numerik yang digunakan menggunakan metode elemen hingga (Finite Element Method) untuk melihat strength factor dan nilai sigma 1 yang akan menjadi acuan faktor keamanan dengan menggunakan metode mohr-coulomb.

3. Hasil dan Pembahasan

Model pilar dengan material beton memiliki karakteristik sifat fisik dengan density sebesar $1,544 \text{ gr/cm}^3$ nilai kohesi 1,66 Mpa dan sifat mekanik kuat tekan 3,64 Mpa modulus young 499,28 Mpa dengan cepat rambat gelombang sebesar 1.715,27 m/s.

Tegangan Pada Model Pilar

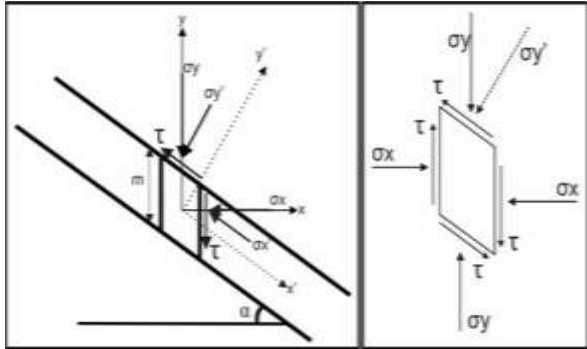
Model pilar ini memiliki dimensi pilar yang bervariasi, selain variasi ketinggian dimensi pilar memiliki kemiringan dengan variasi $0^\circ - 30^\circ$. hal ini menyebabkan kondisi tegangan yang berbeda antara kemiringan permukaan pilar yang horizontal (0°) dengan kemiringan permukaan pilar $> 0^\circ$.



Gambar 3. Kondisi Tegangan pada pilar permukaan horizontal

Tabel 1. Tegangan Pilar permukaan horizontal

α (...°)	Dimensi (Cm)			A (mm ²)	Rasio (W/H)	F (N)	Fn (N)	$\sigma = \sigma_n$ (N/mm ²) (MPa)
	W	H	L					
0	20	40	20	4000	0,50	239300	239300	5,982
	20	30	20	4000	0,67	224830	224830	5,620
	20	20	20	4000	1,00	216950	216950	5,423
	20	10	20	4000	2,00	391890	391890	9,797
	20	5	20	4000	4,00	643330	643330	16,08



Gambar 4. Kondisi Tegangan pada pilar permukaan yang memiliki kemiringan

Tabel 2. Tegangan pada pilar dengan kemiringan permukaan pilar > 0°

α (...°)	Dimensi (Cm)			A' (mm ²)	Rasio (W/H)	F (kN)	σ_y (N/mm ²) (MPa)	ζ (MPa)
	W	H	L					
5	20	40	20,076	40152,79	0,50	190583,77	4,746	4,71
	20	30	20,076	40152,79	0,67	214644,24	5,346	5,31
	20	20	20,076	40152,79	1,00	286185,66	7,127	6,91
	20	10	20,076	40152,79	2,00	288045,69	7,174	6,95
	20	5	20,076	40152,79	4,00	306606,06	7,636	7,57
	20	40	20,308	40617,06	0,50	29558,2	7,277	7,06
10	20	30	20,308	40617,06	0,67	29159,3	7,179	6,96
	20	20	20,308	40617,06	1,00	3474,2	8,555	8,00
	20	10	20,308	40617,06	2,00	343692,1	8,462	7,89
	20	5	20,308	40617,06	4,00	342742,1	8,438	8,16
	20	40	20,705	41411,05	0,50	236654,6	5,715	5,33
	20	30	20,705	41411,05	0,67	264243,9	6,381	5,95
15	20	20	20,705	41411,05	1,00	280363,5	6,770	5,93
	20	10	20,705	41411,05	2,00	338642,2	8,178	7,19
	20	5	20,705	41411,05	4,00	595636,3	14,384	13,36
	20	40	21,283	42567,11	0,50	295303,8	6,937	6,13
	20	30	21,283	42567,11	0,67	198965,8	4,674	4,13
	20	20	21,283	42567,11	1,00	240845	5,658	4,58
20	20	10	21,283	42567,11	2,00	258774,6	6,079	4,84
	20	5	21,283	42567,11	4,00	539388,7	12,671	11,07

25	20	40	22,067	44135,12	0,50	197096,1	4,466	3,67	1,71
	20	30	22,067	44135,12	0,67	219665,6	4,977	4,09	1,91
	20	20	22,067	44135,12	1,00	206085,9	4,669	3,45	1,79
	20	10	22,067	44135,12	2,00	265564,7	6,017	4,37	2,30
	20	5	22,067	44135,12	4,00	350623	7,944	6,33	3,04
	20	40	23,094	46188,02	0,50	263830,1	5,712	4,28	2,47
30	20	30	23,094	46188,02	0,67	280000,1	6,062	4,55	2,63
	20	20	23,094	46188,02	1,00	285540,1	6,182	4,64	2,68
	20	10	23,094	46188,02	2,00	303020,1	6,561	4,92	2,84
	20	5	23,094	46188,02	4,00	366931,9	7,944	5,96	3,44

Nilai tegangan pada model pilar menunjukkan semakin curam sudut kemiringan permukaan pilar maka nilai tegangan geser pada permukaan atap dan lantai pilar akan semakin besar.

Pengaruh Bentuk Pada Kuat Tekan Uniaksial Pilar

Dimensi pilar yang bervariasi akan mempengaruhi pada nilai kuat tekan pada model pilar dengan menggunakan persamaan ASTM dan Protodyakonov (Gambar 5).

Menurut ASTM

$$\sigma_c (l = D) = \frac{\sigma_c}{0,778 + 0,222 \frac{D}{L}}$$

Menurut Protodyakonov

$$\sigma_c (l = 2D) = \frac{8\sigma_c}{7 + 2 \frac{D}{L}}$$

Keterangan :

σ_c = kuat tekan uniaksial (MPa)

D = lebar pilar (D = W) (m)

L = tinggi pilar (L = H) (m)

Pengaruh Bentuk dan Kemiringan Pada Kekuatan Pilar

Pendekatan nilai kekuatan pilar menggunakan persamaan Obert & Duvall (1967) yang mengasumsikan pilar dengan rasio w/h akan berbanding lurus dengan nilai kekuatan pilar (Gambar 6).

$$P_s = K \times \left[0,778 + 0,222 \left(\frac{w}{h} \right) \right]$$

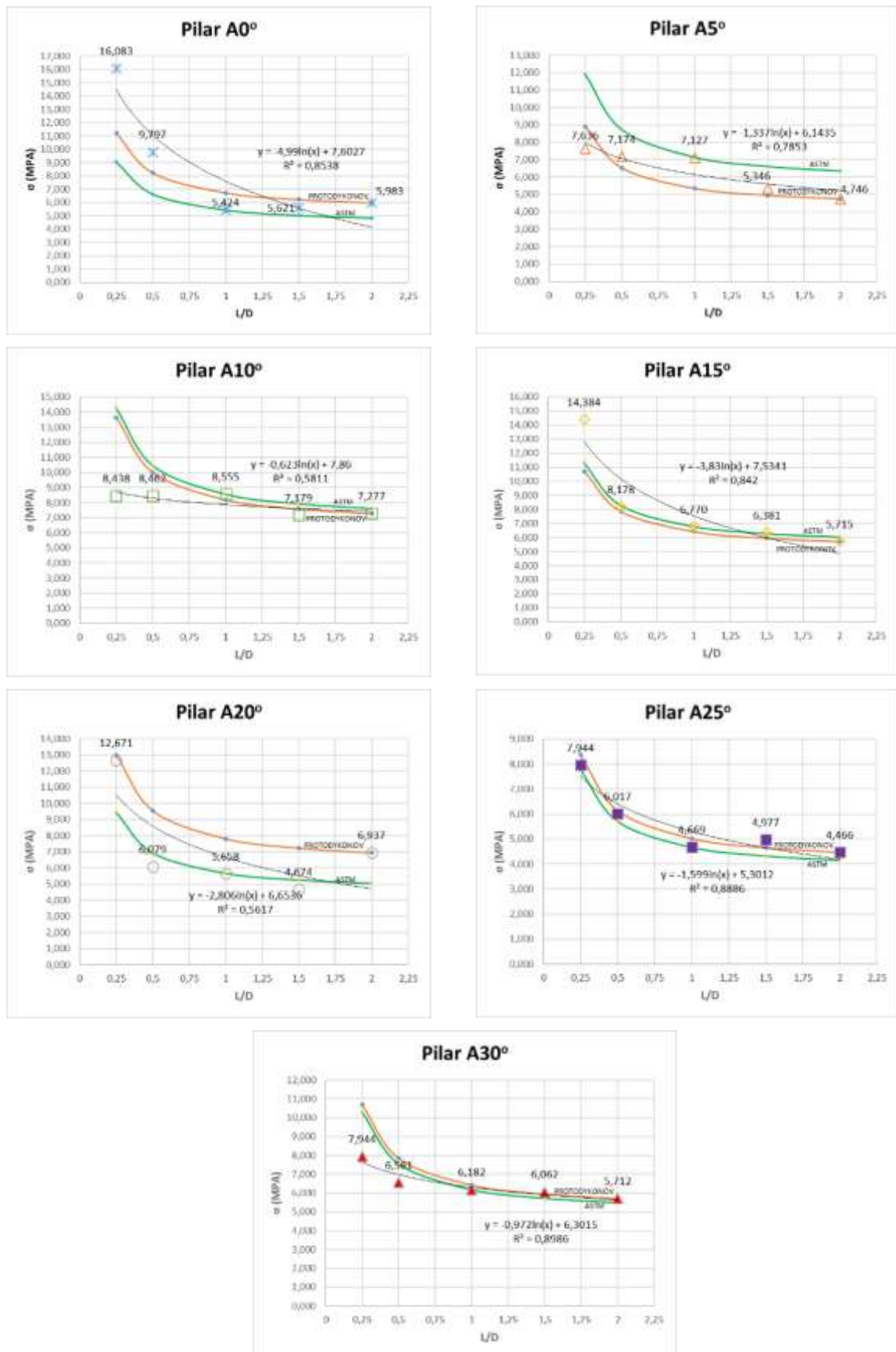
Keterangan :

P_s = pillar strength (MPa)

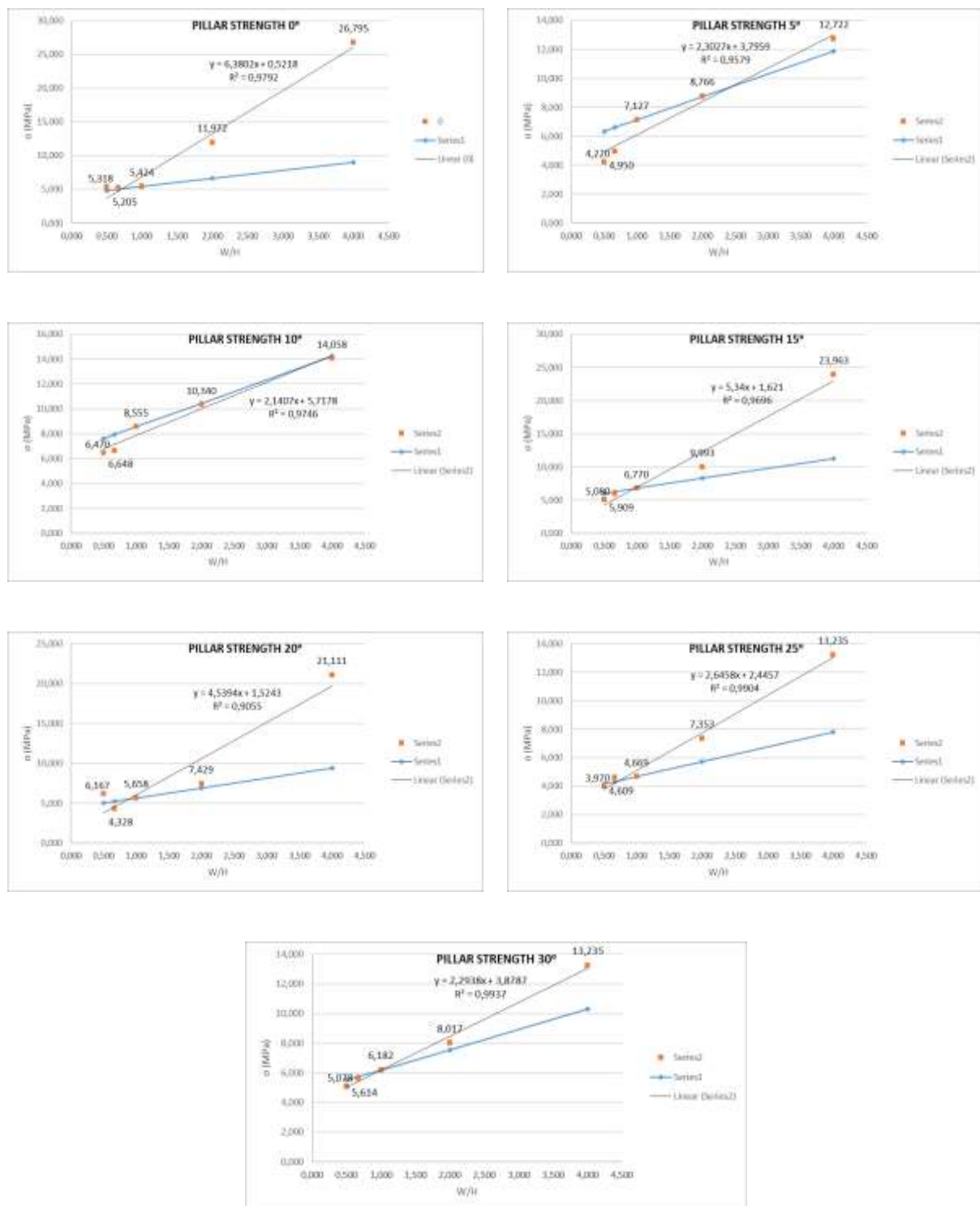
K = Unconfined compressive strength of cubical pillar specimen (MPa)

w = pillar width (m)

h = pillar height (m)



Gambar 5. Perbandingan Hasil Uji Kuat Tekan dengan Pendekatan ASTM dan Protodyakonov



Gambar 6. Perbandingan Hasil kekuatan pilar dengan Pendekatan Obert & Duvall (1967)

Pengaruh Bentuk dan Kemiringan pada Faktor Keamanan Pilar

Faktor keamanan pada pilar dilakukan dengan pendekatan permodelan numerik dengan metode emlemen hingga (finite element methode) melalui perangkat lunak phase2. Geometri model yang digunakan sesuai dengan geomteri model fisik dengan 2 kondisi ekstrim yaitu kemiringan 0° dan 40° , berikut data input parameter yang digunakan.

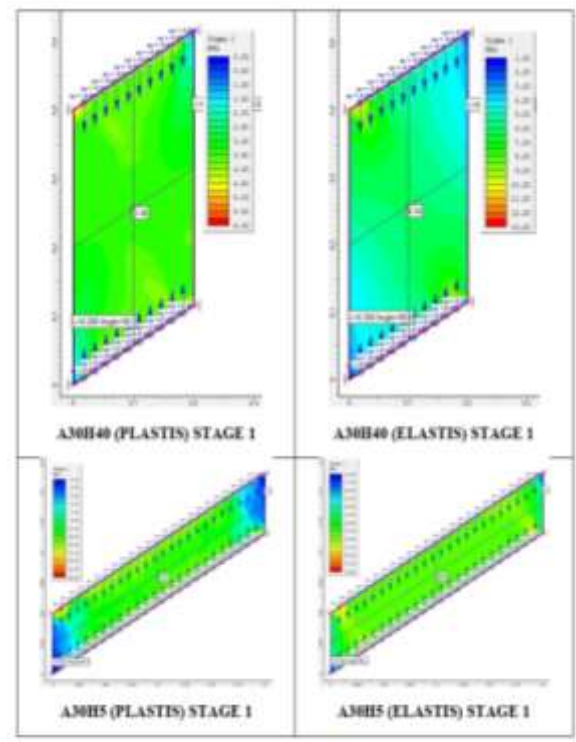
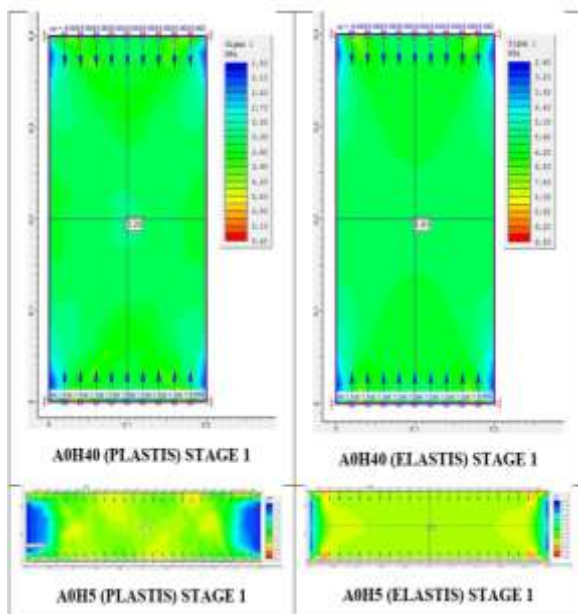
Tabel 3. Input Parameter Permodelan Numerik

Parameter Input	Satuan	Beton
Modulus Young	MPa	530,41
Nisbah Poisson		0,31
Kohesi	MPa	1,66
Sudut Gesek Dalam $^\circ$	35,75

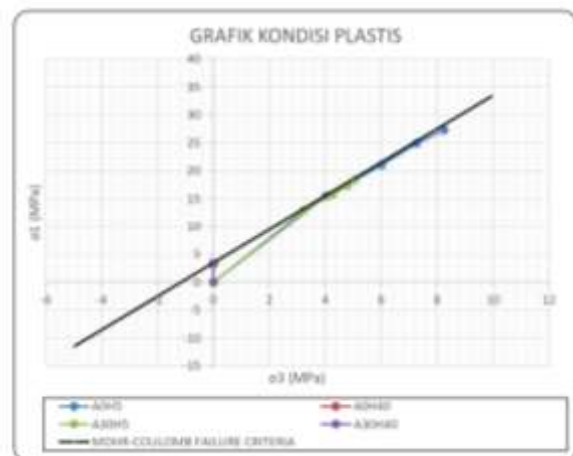
Kondisi Batas

Kondisi batas model menggunakan *restrain* x pada ujung pilar dan diberikan pergerakan pada pilar searah sumbu y berdasarkan *displacement rate* 2 mm (stage 1) dan dilakukan peningkatan pergerakan hingga sebesar 8 mm (stage 4).

Dalam perhitungan faktor keamanan menggunakan metode mohr-coulomb dengan nilai acuan yang digunakan adalah nilai sigma 1 pada bagian tengah tubuh pilar dari hasil permodelan numerik.



Gambar 7. Hasil intrepretasi model sigma 1 dengan dimensi pilar tinggi 40 cm dan 5 cm, kemiringan kemiringan 0° dan 40°



Gambar 8. Grafik kriteria keruntuhan mohr-coulomb dengan nilai sigma 1 dan sigma hasil permodelan dalam kondisi plastis

Tabel 4. Nilai Faktor Keamanan Pilar dalam Kondisi Plastis

	A0H5	A0H40	A30H5	A30H40
STAGE 1	1,005	1,070	1,024	1,030
STAGE 2	1,026	1,056	1,034	1,019
STAGE 3	1,016	1,046	1,035	1,014
STAGE 4	1,035	1,038	1,014	1,016

Kesimpulan

Berdasarkan hasil permodelan fisik dan numerik pengaruh bentuk dan kemiringan terhadap kondisi tegangan terjadi perubahan yang berbanding lurus seiring dengan perubahan kemiringan yang semakin besar untuk nilai tegangan geser, sedangkan pengaruh bentuk untuk rasio W/H terhadap nilai kuat tekan akan semakin kecil ketika rasio pilar w/h semakin besar namun perubahan kemiringan permukaan pilar pada rasio yang sama tidak menunjukkan trend perubahan yang linear terhadap nilai kuat tekan. Hasil permodelan numerik pada ketinggian 5 cm kemiringan permukaan pilar tidak ada perubahan yang signifikan namun pada ketinggian 40 cm terjadi penurunan nilai faktor keamanan namun penurunan yang terjadi tidak signifikan.

Daftar pustaka

- Bieniawski, Z. T. and Van Heerden, W. L. (1975). *The significance of in situ tests on large rock specimens*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 12, (101-113).
- C.D. Martin. and W.G. Maybee (2000). *The strength of hard-rock pillars*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 37, (1239 – 1246).
- Exadaktylos, G.E. and Tsoutrelis, C.E. (1995), *Pillar Failure by Axial Splitting in Brittle Rocks*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 12, (101-113). Vol 32, No 6, (551-562).
- Hoek, E and Brown, E.T. (1980). *Underground Excavation In Rock*. The Institution of Mining and Metallurgy. London.
- Krauland, N. And Soder PE. (1987). *Determining Pillar Strength From pillar failure observations*. Eng Min J. 34 – 40.
- Lunder, P.J. (1983), *Hard Rock Pillar Strength Estimation An Applied Empirical Approach*, Thesis Departement Of Mining and Mineral Process Engineering The University Of British Columbia, Canada
- Moomivand, H and Vutukuri, V.S., (2008), *An Investigation Into The Compressive Strength And Failure Mechanism Of*

Mine Pillars, 5th Asian Rock Mechanics Symposium, Iran.

- Rai, M. A., Kramadibarata, S., dan Wattimena, R. K. (2014). *Mekanika Batuan*. Bandung: ITB
- Salamon, M.D.G, Mendoza, R, Ozbay, M.U., (2003), *Pillar Failure in Deep Coal Seams : Numerical Simulation*, ISRM 2003 – Technology Roadmap For Rock Mechanics, South African Institute of Mining and Metallurgy.
- Salamon, M.D.G, and Munro, A.H. (1967). *A Study of The Strength of Coal Pillars*. J.S Afr Inst Min Metall, 55-67.
- W, Gao, (2014), *Study on width of the Non-Elastic Zone in Inclined Coal Pillar for Strip Mining*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.